

**DAUR OPTIMAL HUTAN TANAMAN SENGON DALAM PROYEK AFORESTASI:
REVIEW HASIL PENELITIAN SUHARLAN 1975**

***(Optimal Rotation of Sengon Plantation in Afforestation Project: Review on Research
Results of Suharlan 1975)***

Yonky Indrajaya*

Balai Penelitian dan Pengembangan Teknologi Agroforestry
Jl. Raya Ciamis-Banjar KM. 4, Po. BOX. 5 Ciamis, Jawa Barat, Indonesia, Kode Pos 46201
Telp. +62265771352, Fax. +62265775866

Article Info

Article History:

Received 21 April 2016;
received in revised form 3
August 2017; accepted 3
August 2017.
Available online since 31
August 2017

Kata kunci:

Tanaman sengon
Daur Hartman
Kayu
Karbon

ABSTRAK

Hutan memiliki peranan yang penting dalam mitigasi perubahan iklim dengan menyerap karbon di atmosfer. Tambahan pendapatan dari penjualan jasa lingkungan penyerapan karbon dapat merubah manajemen optimal hutan tanaman. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis daur optimal produksi bersama kayu dan jasa lingkungan penyerapan karbon dari tegakan sengon di Pulau Jawa. Metode penelitian yang digunakan adalah metode Hartman yang merupakan modifikasi dari metode Faustmann untuk maksimasi keuntungan dari penjualan kayu dan jasa lingkungan penyerapan karbon. Hasil penelitian ini menunjukkan: (1) daur biologis hutan sengon pada bonita III dan IV berturut-turut adalah 6 dan 5 tahun, (2) daur finansial hutan sengon pada bonita III dan IV adalah 8 dan 6 tahun, dan (3) penambahan penjualan jasa lingkungan karbon pada proyek aforestasi CDM tidak memperpanjang daur optimal finansial sengon.

Keywords:

Sengon plantation
Hartman rotation
Timber
Carbon

ABSTRACT

Forests play an important role in climate change mitigation by absorbing carbon dioxide in the atmosphere. Additional revenue from carbon credits may change the optimal management of plantation forest. This research aims to analyze the optimal rotation of joint production of timber and carbon sequestration of sengon stand in Java. The method used in this research is the profit maximization of forest stand obtained from wood sales and carbon credits (i.e. Hartman rule as a modification of Faustmann rule). The results of this study showed that (1) the biological rotation of sengon forest in site quality (SQ) III and IV are 6 and 5 years respectively, (2) Financial rotations of sengon forest in SQ III and IV are 8 and 6 years respectively, and (3) Additional income from carbon sales in afforestation project will not lengthen the optimal rotation of sengon plantation.

* Corresponding author. Tel.: +62 81392577088
E-mail address: yonky_indrajaya@yahoo.com (Y. Indrajaya)

I. PENDAHULUAN

Hutan memiliki peranan penting dalam mitigasi perubahan iklim dengan menyerap karbon di atmosfer. Beberapa strategi yang dapat dilakukan dalam mitigasi perubahan iklim melalui manajemen hutan, meliputi: (1) konservasi dan menjaga stok karbon yang terdapat di hutan, (2) meningkatkan stok karbon melalui aforestasi, (3) modifikasi komposisi spesies dan distribusi ukuran tegakan hutan, (4) mengutamakan penanaman jenis-jenis yang lebih resilien, dan (5) menanam pohon untuk memberikan naungan, menstabilkan tanah, dan memberikan fungsi hidroorologis untuk mengurangi erosi dan perubahan suhu (Bravo *et al.*, 2008).

Kesepakatan global untuk mengurangi dampak perubahan iklim telah dilakukan melalui forum konferensi para pihak sejak tahun 1990an. Kesepakatan awal telah dicapai pada tahun 1997, yaitu pada CoP (*Conference of the Parties*) ke 5 di Kyoto, Jepang yaitu Protocol Kyoto. Dalam protocol ini, negara maju berkomitmen untuk menurunkan emisinya pada tingkat emisi tahun 90 melalui mekanisme *Emission Trading (ET)*, *Joint Implementation (JI)*, *Clean Development Mechanism (CDM)*. Negara berkembang dapat berperan pula dalam menurunkan emisi global melalui mekanisme pembangunan bersih (CDM), termasuk sektor kehutanan yang berperan dalam CDM melalui kegiatan aforestasi dan reforestasi.

Potensi pendapatan yang dapat diperoleh dari penjualan jasa lingkungan karbon dari sektor kehutanan, khususnya pada hutan tanaman, dapat memperngaruhi manajemen optimal tegakan termasuk penentuan daur tebang. Pada umumnya daur optimal tanaman sengon ditentukan dengan metode daur volume maksimum (daur biologis), yaitu waktu dimana riap tahunan rata-rata (MAI) sama dengan riap tahun berjalan (CAI) (Krisnawati *et al.*, 2011; Riyanto & Putra, 2010). Namun demikian, daur ini belum tentu memberikan keuntungan yang maksimal (Amacher *et al.*, 2009). Daur Faustmann digunakan untuk menentukan daur optimal secara finansial apabila hanya mempertimbangkan kayu sebagai sumber pendapatan (Indrajaya & Siarudin, 2013). Daur Faustmann telah ditemukan cukup lama oleh ekonom Jerman (Viitala, 2016). Walaupun kritik akan teori Faustmann telah dilakukan, namun dalam teori kapital kehutanan, teori ini masih cukup relevan digunakan dalam maksimasi keuntungan tegakan hutan (Sauter *et al.*, 2016). Apabila sumber pendapatan yang diperhitungkan tidak hanya kayu, tetapi jasa lingkungan yang diperoleh dari tegakan hutan, maka daur Hartman yang merupakan modifikasi dari daur Faustmann banyak digunakan (Galinato & Uchida, 2011; Köthke & Dieter, 2010; Olschewski & Benitez,

2010; Zhou & Gao, 2016). Daur Hartman diperkenalkan ketika hutan disadari juga memiliki produk lain selain kayu yaitu jasa lingkungan (Hartman, 1976). Daur ini mempertimbangkan semua volume kayu dan jasa lingkungan (misalnya karbon) yang diproduksi dan dapat dijual dari suatu tegakan hutan.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis daur optimal hutan tanaman sengon dalam konteks proyek aforestasi dalam kerangka CDM. Jenis sengon dipilih karena sengon telah lama dikembangkan di Indonesia khususnya di Pulau Jawa untuk memenuhi kebutuhan akan kayu konstruksi dan industri. Jenis ini dipilih oleh para petani maupun pengusaha besar karena jenis sengon memiliki nilai ekonomis yang tinggi, tumbuh cepat, dan mampu beradaptasi dengan berbagai jenis tanah (Krisnawati *et al.*, 2011). Pool karbon yang diperhitungkan dalam penelitian ini, selain pool karbon di atas permukaan tanah, juga pool karbon dalam kayu tebang seperti halnya yang dilakukan oleh Asante dan Armstrong (2012), sedangkan pool karbon yang tersimpan di bawah permukaan tanah tidak diperhitungkan dalam penelitian ini.

II. METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah penentuan daur optimal finansial Hartman yang merupakan maksimasi keuntungan yang diperoleh dari penjualan kayu dan jasa lingkungan penyerapan karbon. Daur Hartman merupakan modifikasi dari daur Faustmann yang telah banyak diterapkan di Eropa dan Amerika (Asante *et al.*, 2011; Olschewski & Benitez, 2010).

A. Tempat, Waktu Penelitian dan Data Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Kabupaten Ciamis pada tahun 2015, meliputi pengumpulan data perusahaan hutan tanaman sengon (biaya pembangunan hutan tanaman sengon dan harga kayu sengon). Data pertumbuhan tanaman sengon mengikuti tabel tegakan hutan tanaman sengon Suharlan *et al.* (1975) yang dibangun berdasarkan data plot penelitian yang ada di Pulau Jawa, yaitu di Jasinga, Kebun Raya Bogor, Pekalongan, Malang, dan Kediri. Walaupun tabel tegakan normal ini telah cukup lama, namun masih banyak digunakan karena masih cukup relevan hingga saat ini, misalnya hasil penelitian Riyanto dan Putra (2010) menunjukkan bahwa tabel tegakan Suharlan *et al.* (1975) kurang lebih sama dengan tabel tegakan yang dibuat oleh Riyanto dan Putra (2010).

B. Bahan dan Alat Penelitian

Bahan penelitian ini adalah tabel tegakan normal hutan tanaman sengon (Suharlan *et al.*,

1975). Tabel ini menunjukkan pertumbuhan volume tegakan hutan tanaman sengon yang dinyatakan dalam m^3/ha . Jumlah penjarangan yang dilakukan diasumsikan sama dengan yang dianjurkan oleh Suharlan *et al.* (1975) sesuai dengan bonitanya. Walaupun data yang digunakan cukup lama, namun demikian masih cukup relevan sebagai referensi tegakan normal hutan tanaman sengon (Krisnawati *et al.*, 2011). Bonita yang umumnya diukur berdasarkan rata-rata tinggi pohon dominan dan ko-dominan telah diperkenalkan oleh seorang rimbawan pada tahun 1921 (Bettinger *et al.*, 2009) dan karena cukup sederhana, bonita masih digunakan sampai sekarang.

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah seperangkat komputer dengan perangkat lunak MS Excel untuk perhitungan daur optimal tegakan sengon.

C. Tahapan Pelaksanaan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dalam dua tahap: pertama, penentuan daur optimal tegakan sengon apabila hanya mempertimbangkan kayu sebagai sumber pendapatan, kedua penentuan daur optimal tegakan sengon apabila mempertimbangkan penjualan jasa lingkungan penyerapan karbon dari tegakan sengon dalam proyek aforestasi. Tahapan penentuan daur optimal tegakan sengon dijelaskan sebagai berikut:

1. Daur optimal tegakan sengon

Metode penentuan daur optimal dalam pengelolaan hutan tanaman yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu:

a. Daur biologis

Daur biologis atau daur volume maksimum dihitung berdasarkan riap volume rata-rata tahunan (MAI) $S(T)/T$ = riap volume tahun berjalan (CAI) $S'(T)$, dimana S merupakan stok kayu pada waktu T .

b. Daur Faustmann

Daur Faustmann dihitung berdasarkan *Net Present Value (NPV)* dari tegakan hutan tanaman dalam rotasi tak hingga. NPV dari daur Faustmann seringkali disebut sebagai LEV (*Land Expectation Value*). Karena daur Faustmann hanya menghitung kayu sebagai sumber pendapatan, maka NPV^w merupakan nilai *present value* dari tegakan hutan yang bersumber dari kayu. Rh_T merupakan pendapatan yang diperoleh dari kayu hasil tebangan pada akhir daur T . Pendapatan lain yang diperoleh dari suatu tegakan sengon adalah pendapatan dari kayu hasil penjarangan Rs_a yang diperoleh pada tahun a . Biaya pembangunan hutan tanaman dinotasikan dengan K dan r

merupakan suku bunga riil. Secara matematis LEV Faustmann ditunjukkan pada persamaan:

$$LEV = NPV^w = \frac{Rh_T + \sum_a^T (Rs_a(1+r)^{T-a}) - K(1+r)^T}{(1+r)^T - 1} \rightarrow \max \quad (1)$$

c. Daur Hartman

Selain pendapatan yang diperoleh dari kayu, suatu tegakan hutan dapat memperoleh pendapatan dari penjualan jasa lingkungan karbon. NPV yang diperoleh dari pendapatan hasil penjualan jasa lingkungan karbon dinotasikan sebagai NPV^c . Pendapatan yang diperoleh dari penjualan jasa lingkungan karbon tiap a tahun dinotasikan sebagai Rc_a . Total NPV^c secara matematis dijelaskan pada persamaan:

$$NPV^c = \frac{\sum_a^T (Rc_a(1+r)^{T-a})}{(1+r)^T - 1} \quad (2)$$

LEV yang diperoleh dari kayu dan karbon merupakan penjumlahan NPV^w dan NPV^c .

$$LEV = NPV^w + NPV^c \rightarrow \max \quad (3)$$

Data biaya pembangunan hutan tanaman sengon (Rp/ha), biaya pemanenan (Rp/m³), dan harga kayu (Rp/m³) diperoleh dari wawancara dengan petani pengusaha hutan tanaman sengon di wilayah Ciamis, Jawa Barat. Data tingkat suku bunga riil diperoleh dari Bank Dunia. Harga karbon diperoleh berdasarkan perkiraan harga pasar karbon yang ada (Kindermann *et al.*, 2008).

2. Karbon tersimpan dalam tegakan sengon

a. Karbon tersimpan dalam biomassa di atas permukaan tanah

Karbon tersimpan dalam biomassa di atas permukaan tanah tegakan hutan tanaman diestimasi menggunakan persamaan:

$$AGB = \sum S(T) \times \rho \times BEF \quad (4)$$

Dimana AGB merupakan berat biomassa di atas permukaan tanah (ton/ha), ρ merupakan berat jenis kayu (gr/cm³), dan BEF merupakan *biomass expansion factor*. Berat jenis kayu sengon yang digunakan adalah 0,26 (Zanne *et al.*, 2009) dan nilai BEF jenis sengon adalah 1,34 (Krisnawati *et al.*, 2012). Jumlah karbon tersimpan dalam biomassa adalah sebesar 0,47 dari berat biomassanya (IPCC, 2006). Karbon dioksida ekuivalen yang tersimpan dalam biomassa adalah sebesar 44/12 kali jumlah karbon tersimpan dalam biomassa.

b. Karbon tersimpan dalam kayu penjarangan

Tidak semua kayu yang hasil penjarangan akan digunakan sebagai produk kayu akhir, namun sebagian akan terbuang dengan

proporsi ω . Limbah kayu yang tak terpakai diasumsikan akan segera dibakar, sehingga akan segera mengemisi karbon pada saat pemanenan. Sedangkan kayu yang digunakan dalam produk akhir akan teroksidasi sebesar δ per tahun. Proporsi limbah kayu ω diasumsikan sebesar 0,5 (Kementerian Kehutanan, 2009) dan rata-rata oksidasi tahunan δ sebesar 0.04 (Winjum, Brown, & Schlamadinger, 1998). Sehingga total karbon yang tersimpan dalam biomassa kayu yang digunakan dalam produk akhir pada tahun ke t setelah penjarangan adalah:

$$CHW_t = HW_a(1 - \omega)(1 + \delta)^{-(t-a)} \quad (5)$$

Dimana CHW_t merupakan jumlah karbon tersimpan dalam biomassa produk kayu pada tahun ke- t dan HW_a adalah jumlah karbon tersimpan dalam biomassa produk kayu pada saat penebangan penjarangan tahun ke- a .

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan volume tegakan dilakukan menggunakan tabel tegakan hutan normal hutan tanaman sengon yang dibuat oleh Suharlan *et al.* (1975) seperti disajikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Pertumbuhan tegakan sengon pada bonita III dan IV

Umur (Year)	Bonita (Site quality) III		Bonita (Site quality) IV	
	N/Ha	Volume (m ³ /ha)	N/Ha	Volume (m ³ /ha)
2	915	31	775	49
3	645	65	465	89
4	425	94	280	121
5	275	118	180	145
6	195	137	135	164
7	160	152	120	178
8	140	165	110	190
9	125	176	100	200
10	115	185	100	208
11	110	192	100	215
12	110	199	95	221

Sumber: Diolah dari Suharlan *et al.*, 1975

Source: Modified from Suharlan *et al.*, 1975

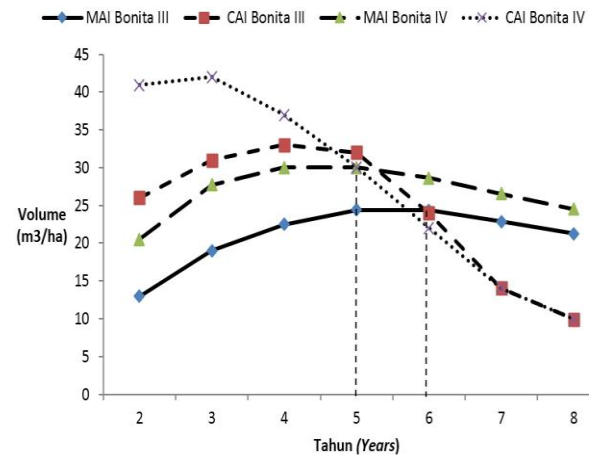
A. Daur Biologis

Sengon merupakan jenis cepat tumbuh dimana riap tahunan rata-ratanya (MAI) dapat mencapai 30 m³/ha/tahun (Gambar 1) yang dicapai pada tahun ke-4. Sementara, riap tahun berjalan (CAI) tertinggi dapat mencapai > 40 m³/ha/tahun yang dicapai pada tahun ke-3. Pada bonita III dan IV daur biologis tegakan sengon berturut-turut adalah 6 dan 5 tahun.

B. Daur Faustmann

Dalam perhitungan daur Faustmann, beberapa parameter yang digunakan meliputi

harga kayu per m³, biaya pemanenan per m³, biaya pembangunan hutan (termasuk pengadaan bibit, penanaman, pemeliharaan, dll) per ha, serta suku bunga riil. Parameter yang digunakan dalam perhitungan daur Faustmann disajikan dalam Tabel 2.



Gambar 1. Daur biologis tegakan sengon pada bonita III dan IV

Figure 1. Biological rotation of sengon plantation of site class III and IV

Tabel 2. Parameter yang digunakan dalam perhitungan

Parameter	Nilai (Value)	Keterangan (Remarks)
Harga kayu per m ³	Rp. 800.000	Harga kayu rata-rata di pasar
Harga kayu per m ³ pada akhir daur	Rp. 350.000	Harga kayu rata-rata di pasar
Harga kayu per m ³ penjarangan	Rp. 50.000	Diperoleh dari komunikasi personal terhadap tengkulak kayu sengon
Biaya pemanenan per m ³	Rp. 15.000.000	Diperoleh dari komunikasi personal dengan pengusaha hutan rakyat sengon
Biaya pembuatan hutan (pengadaan bibit, penanaman, pemupukan, dll) per ha	4%	World Bank (2013)
Suku bunga riil rata-rata 20 tahun terakhir		

Mempertimbangkan kayu sebagai satu-satunya sumber pendapatan memberikan daur yang berbeda dengan daur biologisnya. Lampiran 1 menunjukkan nilai LEV yang diperoleh berdasarkan jumlah pendapatan dikurangi dengan pengeluaran dari tegakan sengon dari rotasi tak hingga. Nilai LEV tertinggi tegakan sengon bonita III diperoleh pada umur 8 tahun yaitu sebesar Rp503.429.589,-. Nilai ini diperoleh dari pendapatan yang berasal dari kayu yang dipanen pada akhir daur sebesar Rp123.777.964,- dan kayu hasil penjarangan sebesar Rp82.299.138,-. Total kayu hasil panen di akhir daur sebesar 165 m³, sedangkan total kayu hasil penjarangan yang panen tiap tahun mulai tahun ke-3 hingga tahun ke-8 sebesar 248 m³.

Pada tegakan sengon bonita IV, nilai LEV tertinggi diperoleh pada umur 6 tahun, yaitu sebesar Rp609.135.494,-. Nilai ini diperoleh dari pendapatan yang berasal dari kayu yang dipanen pada akhir daur sebesar Rp122.678.711,- dan kayu hasil penjarangan sebesar Rp57.916.305,-. Total kayu hasil panen di akhir daur adalah sebesar 164 m³, sedangkan total kayu hasil penjarangan yang dilakukan tiap tahun mulai tahun ke-3 hingga tahun ke-6 adalah sebesar 167 m³.

Pada umumnya daur Faustmann lebih pendek dari daur biologisnya seperti yang terjadi di hutan tanaman di Amerika dan Eropa (Amacher *et al.*, 2009; Olschewski & Benitez, 2010). Hal ini disebabkan oleh nilai NPV dari tiap daur yang didiskon dan diuangkan, sehingga biaya kesempatan (*opportunity cost*) untuk menunda penebangan menjadi lebih besar. Sehingga, menebang lebih cepat dari daur biologisnya akan memberikan keuntungan yang maksimal.

Namun, daur Faustmann pada tegakan sengon dengan mempertimbangkan pendapatan dari kayu penjarangan lebih panjang dari daur biologisnya. Hal ini terjadi seperti yang telah dijelaskan oleh Binkley (1987) yaitu pada hutan tanaman yang relatif tumbuh cepat seperti di daerah tropis, dimana nilai MAI maksimum diperoleh pada waktu < 20 tahun, maka daur Faustmann pada tingkat suku bunga riil 4% bisa lebih panjang dari daur biologisnya. Apabila tidak memperhitungkan penjualan dari kayu penjarangan, daur Faustmann pada bonita III dan IV sama dengan daur biologisnya (Indrajaya, 2013).

A. Daur Hartman

Untuk menghitung daur Hartman, dimana jasa lingkungan karbon diasumsikan dapat dijual di pasar karbon, maka perhitungan jumlah karbon tersimpan dalam biomassa hutan perlu dilakukan menggunakan persamaan 4 dan 5.

1. Karbon tersimpan dalam biomassa di atas permukaan tanah

Berdasarkan data dari Suharlan *et al.* (1975) dan hasil perhitungan menggunakan persamaan 4 diperoleh estimasi berat karbon yang tersimpan di dalam biomassa tegakan sengon di atas permukaan tanah seperti disajikan pada Tabel 3. Karbon tersimpan dalam biomassa di atas permukaan tanah tegakan sengon pada umur 12 tahun pada bonita III dan IV berturut-turut adalah sebesar 33 dan 36 ton/ha. Sedangkan karbon tersimpan dalam biomassa di dalam kayu hasil penjarangan tertinggi pada penjarangan tahun ke 6 -8 pada bonita III, yaitu sebesar 9 ton C/ha. Pada bonita IV, karbon tersimpan dalam kayu penjarangan tertinggi adalah pada penjarangan

tahun ke-5 dan 6 yaitu sebesar 9 ton C/ha. Intensitas penjarangan yang dilakukan dalam tegakan sengon ini mengikuti tabel tegakan normal jenis sengon yang dibuat oleh Suharlan *et al.* (1975).

Tabel 3. Karbon tersimpan dalam biomassa di atas tanah tegakan sengon

Table 3. Carbon stored in aboveground biomass of sengon stand

Umur	C-AGB (ton/ha)		C-HWP (ton/ha)	
	Bonita III	Bonita IV	Bonita III	Bonita IV
2	5	8	1	1
3	11	15	2	4
4	15	20	5	8
5	19	24	8	9
6	22	27	9	9
7	25	29	9	8
8	27	31	9	7
9	29	33	8	7
10	30	34	8	6
11	31	35	8	6
12	33	36	7	6

2. Karbon tersimpan dalam kayu penjarangan

Kayu hasil penjarangan sengon diasumsikan digunakan sebagai kayu gergajian. Karbon tersimpan dalam biomassa kayu penjarangan akan teroksidasi dengan tingkat oksidasi tahunan sebesar 0,04 (Winjum *et al.*, 1998). Karbon tersimpan dalam biomassa kayu hasil penjarangan dari tegakan sengon bonita III dan IV disajikan pada Tabel 4 dan 5.

Tabel 4 menunjukkan jumlah karbon tersimpan dalam kayu hasil penjarangan tegakan sengon pada bonita III. Pada tahun ke-2, jumlah karbon tersimpan dalam produk akhir kayu penjarangan sebesar setara dengan 0,3 ton/ha dan teroksidasi tiap tahun hingga hanya tinggal setara dengan 0,2 ton/ha pada tahun ke-12. Kegiatan penjarangan tegakan sengon terus dilakukan hingga umur 12 tahun.

Tabel 5 menunjukkan jumlah karbon yang tersimpan dalam kayu hasil penjarangan tegakan sengon pada bonita IV yang teroksidasi tiap tahun. Pada tahun ke-2, jumlah karbon tersimpan dalam biomassa kayu di produk akhir sebesar 0,5 ton/ha dan teroksidasi tiap tahun hingga hanya tersimpan sebesar 0,3 ton/ha pada tahun ke-12. Berdasarkan perhitungan karbon tersimpan dalam biomassa di atas permukaan tanah dan di dalam kayu penjarangan, dapat dihitung total pendapatan yang dapat diperoleh dari kayu dan karbon pada beberapa harga karbon. Jumlah karbon yang tersimpan dalam biomassa tegakan hutan sengon dan kayu penjarangan sengon merupakan jasa lingkungan karbon dari tegakan sengon dalam proyek aforestasi. Total karbon yang tersimpan dalam biomassa tersebut kemudian dikonversi menjadi CO₂ eq. Estimasi

harga karbon yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebesar 3, 5, dan 7 USD per ton CO₂ eq. sesuai harga karbon dunia. Hasil perhitungan NPV Kayu, Karbon, dan Produksi Bersama Kayu dan Karbon pada harga karbon 3 - 7 USD/ton CO₂ eq. menggunakan persamaan (3) disajikan dalam Lampiran 2.

Lampiran 2 menunjukkan bahwa pada tingkat harga karbon sebesar 3, 5 dan 7 USD per ton CO₂, daur optimal tegakan sengan pada bonita III dan IV sama dengan daur Faustmann, yaitu 8 dan 6 tahun. Hal ini terjadi karena pada tahun ke-8 dan tahun ke-6, jumlah karbon tersimpan dalam kayu penjarangan tegakan sengan pada bonita III dan IV menghasilkan NPV yang maksimal. Pertambahan jumlah karbon tersimpan dalam tegakan sengan tidak memberikan nilai yang cukup tinggi bagi karbon untuk menunda penebangan sengan.

Hasil penelitian ini mendukung hasil penelitian yang sama pada tegakan manglid di Jawa Barat yaitu pada tingkat harga karbon 5 USD/ton CO₂ daur optimal Hartman (i.e. menghitung kayu dan karbon sebagai sumber pendapatan) sama dengan daur Faustmann (i.e. hanya menghitung kayu sebagai sumber pendapatan) (Indrajaya & Sudomo, 2015). Selain itu, hasil penelitian ini juga sama dengan hasil penelitian sejenis pada jenis gmelina di Jawa Barat

(Indrajaya & Astana, 2016). Pada proyek aforestasi menggunakan jenis gmelina, dimana kegiatan penanaman dilakukan pada lahan kosong atau lahan pertanian, penambahan nilai karbon dalam biomassa tegakan gmelina tidak berdampak pada daur optimal Faustmann tegakan gmelina (Indrajaya & Astana, 2016). Penelitian lain juga menyebutkan bahwa pada kelas tempat tumbuh yang baik, tambahan pendapatan dari penjualan jasa lingkungan karbon tidak memperngaruhi daur optimalnya (Zhou & Gao, 2016).

Sementara itu, penelitian yang dilakukan oleh Indrajaya and Siarudin (2015) pada tegakan gmelina di Jawa Barat, dimana pada tingkat harga karbon 5 USD/ton CO₂, penundaan penebangan selama satu tahun akan memberikan keuntungan yang maksimum. Perbedaan baseline (i.e. jumlah rata-rata karbon tersimpan dalam biomassa tanpa proyek) yang digunakan tidak memberikan pengaruh yang nyata dalam penentuan daur optimal, namun memberikan perbedaan NPV yang cukup nyata bagi pengelola hutan (Asante & Armstrong, 2016). Penelitian lain di hutan tanaman di Ekuador menyimpulkan bahwa tingkat harga karbon mempengaruhi panjang rotasi tebangan sehingga semakin tinggi tingkat harga karbon semakin panjang pula daur optimalnya (Olschewski & Benitez, 2010).

Tabel 4. Karbon tersimpan dalam kayu penjarangan sengan pada bonita III

Table 4. Carbon stored in thinning wood of sengan of site class III

Tahun /Years	Karbon tersimpan dalam kayu penjarangan/ C-stored in thinning wood (ton C/ha)											Total (ton C/ha)
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
2	0,3											0,3
3	0,3	1,1										1,5
4	0,3	1,1	2,4									3,8
5	0,3	1,1	2,3	3,8								7,4
6	0,3	1,0	2,2	3,6	4,4							11,5
7	0,3	1,0	2,1	3,5	4,2	4,4						15,5
8	0,3	0,9	2,0	3,3	4,1	4,2	4,3					19,1
9	0,2	0,9	1,9	3,2	3,9	4,1	4,1	4,1				22,4
10	0,2	0,9	1,9	3,1	3,8	3,9	3,9	3,9	3,9			25,5
11	0,2	0,8	1,8	2,9	3,6	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8		28,3
12	0,2	0,8	1,7	2,8	3,5	3,6	3,6	3,6	3,6	3,7	3,7	30,9

Tabel 5. Karbon tersimpan dalam kayu penjarangan sengan pada bonita IV

Table 5. Carbon stored in thinning wood of sengan of site class IV

Tahun /Years	Karbon tersimpan dalam kayu penjarangan/ C-stored in thinning wood (ton C/ha)											Total (ton C/ha)
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
2	0,5											0,5
3	0,5	2,0										2,5
4	0,5	2,0	3,8									6,2
5	0,4	1,9	3,6	4,4								10,4
6	0,4	1,8	3,5	4,2	4,3							14,2
7	0,4	1,7	3,3	4,1	4,1	3,8						17,5
8	0,4	1,7	3,2	3,9	3,9	3,7	3,5					20,3
9	0,4	1,6	3,1	3,8	3,8	3,5	3,4	3,4				22,8
10	0,4	1,5	2,9	3,6	3,6	3,4	3,2	3,2	3,2			25,1
11	0,3	1,5	2,8	3,5	3,5	3,3	3,1	3,1	3,1	3,0		27,2
12	0,3	1,4	2,7	3,3	3,3	3,1	3,0	3,0	2,9	2,9	2,9	29,0

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat ditarik dari penelitian ini adalah: (1) daur biologis atau daur volume maksimum hutan sengon pada bonita III dan IV berturut-turut adalah 6 dan 5 tahun, (2) daur finansial Faustmann hutan tanaman sengon pada bonita III dan IV berturut-turut adalah 8 dan 6 tahun, dan (3) penambahan penjualan jasa lingkungan karbon pada proyek aforestasi CDM tidak memperpanjang daur optimal finansial sengon.

B. Saran

Pembangunan hutan tanaman sengon untuk proyek aforestasi, dengan menghitung jumlah karbon tersimpan dalam biomassa termasuk dalam produk kayu, dapat mengikuti daur optimal finansial Faustmann, karena keuntungan yang diperoleh telah maksimum. Estimasi jumlah volume kayu panen dan penjarangan dapat mengikuti tabel tegakan normal Suharlan *et al.* (1975) karena relatif masih relevan hingga sekarang. Jumlah karbon tersimpan dalam biomassa kayu sengon (berdiri dan penjarangan) dapat mengikuti prosedur dalam penelitian ini. Penelitian lanjutan tentang daur Faustmann maupun Hartman dalam sistem agroforestry sengon yang multi-species dan multi-strata menarik untuk dilakukan, mengingat sistem agroforestry sengon banyak dilakukan oleh masyarakat.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada peneliti di lingkup Balai Penelitian dan Pengembangan Teknologi Agroforestry, terutama kepada Aditya Hani, S Hut, MSc dan M. Siarudin, S. Hut, MT, MMG yang telah membantu penulis dalam analisis data dan diskusi tentang pengelolaan hutan tanaman sengon.

DAFTAR PUSTAKA

- Amacher, G. S., Ollikainen, M., & Koskela, E. (2009). *Economics of forest resources*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Asante, P., & Armstrong, G. (2016). Carbon sequestration and the optimal forest harvest decision under alternative baseline policies. *Canadian Journal of Forest Research*, 656-665. doi: 10.1139/cjfr-2015-0222
- Asante, P., & Armstrong, G. W. (2012). Optimal forest harvest age considering carbon sequestration in multiple carbon pools: A comparative statics analysis. *Journal of Forest Economics*, 18(2), 145-156. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfe.2011.12.002>
- Asante, P., Armstrong, G. W., & Adamowicz, W. L. (2011). Carbon sequestration and the optimal forest harvest decision: A dynamic programming approach considering biomass and dead organic matter. *Journal of Forest Economics*, 17(1), 3-17. doi: DOI 10.1016/j.jfe.2010.07.001
- Bettinger, P., Boston, K., Siry, J. P., & Grebner, D. L. (2009). *Forest management and planning*. Burlington USA: Academic Press.
- Binkley, C. S. (1987). When is the optimal economic rotation longer than the rotation of maximum sustained yield? *Journal of Environmental Economics and Management*, 14(2), 152-158.
- Bravo, F., Jandl, R., LeMay, V., & Gadow, K. v. (2008). Introduction. In F. Bravo, R. Jandl, V. LeMay & K. v. Gadow (Eds.), *Managing forest ecosystems: The challenge of climate change* (Vol. 17): Springer.
- Galinato, G. I., & Uchida, S. (2011). The effect of temporary certified emission reductions on forest rotations and carbon supply. *Canadian Journal of Agricultural Economics/Revue canadienne d'agroeconomie*, 59(1), 145-164. doi: 10.1111/j.1744-7976.2010.01203.x
- Hartman, R. (1976). Harvesting decision when a standing forest has value. *Economic Inquiry*, 14(1), 52-58.
- Indrajaya, Y. (2013). Penentuan daur optimal hutan tanaman sengon (*Paraserianthes falcataria* (L.) Nielsen) dengan metode Faustmann. *Jurnal Penelitian Agroforestry*, 1(1), 31-40.
- Indrajaya, Y., & Astana, S. (2016). Daer optimal tegakan gmelina pada dua proyek karbon: Memperpanjang daur dan aforestasi. *Jurnal Penelitian Sosial dan Ekonomi Kehutanan*, 13(3), 145-154.
- Indrajaya, Y., & Siarudin, M. (2013). Daer finansial hutan rakyat jabon di Kecamatan Pakenjeng, Kabupaten Garut, Jawa Barat. *Jurnal Penelitian Hutan Tanaman*, 10(3), 201-211.
- Indrajaya, Y., & Siarudin, M. (2015). *The effects of carbon payment on optimal rotation of Gmelina forests*. Paper presented at the INAFOR 3, Bogor, Indonesia.
- Indrajaya, Y., & Sudomo, A. (2015). *Pengaruh tambahan pendapatan jasa lingkungan karbon terhadap daur optimal tegakan manglid di Jawa Barat*. Paper presented at the AFOCO Workshop "Pengembangan mata pencaharian alternatif untuk masyarakat lokal dalam upaya menghadapi dampak perubahan iklim", Bogor.
- IPCC. (2006). IPCC Guideline 2006 Guidelines for national green house gas inventories: IPCC.
- Kindermann, G., Obersteiner, M., Sohngen, B., Sathaye, J., Andrasko, K., Rametsteiner, E., . . . Beach, R. (2008). Global cost estimates of reducing carbon emissions through avoided deforestation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(30), 10302-10307. doi: DOI 10.1073/pnas.0710616105
- Kementerian Kehutanan (2009). Peraturan Dirjen Bina Produksi Kehutanan No P.13/VI-BPPHH/2009, tentang Rendemen Kayu Olahan Industri Primer Hasil Hutan Kayu (IPHHK) (2009).

- Köthke, M., & Dieter, M. (2010). Effects of carbon sequestration rewards on forest management—an empirical application of adjusted Faustmann formulae. *Forest policy and economics*, 12(8), 589-597.
- Krisnawati, H., Adinugroho, W. C., & Imanuddin, R. (2012). *Model-Model Alometrik untuk Pendugaan Biomassa Pohon pada Berbagai Tipe Ekosistem Hutan di Indonesia (Indonesia versions)*: wahyu catur adinugroho.
- Krisnawati, H., Varis, E., Kallio, M., & Kanninen, M. (2011). *Paraserianthes falcata (L.) Nielsen. Ekologi, Silvikultur dan Produktivitas*. Bogor Indonesia: CIFOR.
- Olschewski, R., & Benitez, P. C. (2010). Optimizing joint production of timber and carbon sequestration of afforestation projects. *Journal of Forest Economics*, 16(1), 1-10. doi: DOI 10.1016/j.jfe.2009.03.002
- Riyanto, H. D., & Putra, P. B. (2010). Model pertumbuhan tegakan hutan tanaman sengon untuk pengelolaan hutan. *Tekno Hutan Tanaman*, 3(3).
- Sauter, P. A., Mußhoff, O., Möhring, B., & Wilhelm, S. (2016). Faustmann vs. real options theory – An experimental investigation of foresters' harvesting decisions. *Journal of Forest Economics*, 24, 1-20. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfe.2016.01.004>
- Suharlan, A., Sumarna, K., & Sudiono, J. (1975). *Tabel Tegakan Sepuluh Jenis Kayu Industri*. Bogor: Pusat Penelitian dan Pengembangan Hutan.
- Viitala, E.-J. (2016). Faustmann formula before Faustmann in German territorial states. *Forest policy and economics*, 65, 47-58. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.forpol.2015.11.004>
- Winjum, J. K., Brown, S., & Schlamadinger, B. (1998). Forest harvests and wood products: Sources and sinks of atmosphere carbon dioxide. *Forest Science*, 44(2), 272-284.
- World Bank. (2013). World Bank Indicator. 1960-2013. Retrieved 10 February, 2014
- Zanne, A. E., Lopez-Gonzalez, G., Coomes, D. A., Ilic, J., Jansen, S., Lewis, S.L., , Miller, R. B., Swenson, , N.G., W., M.C., , & Chave, J. (2009). *Global wood density database*.
- Zhou, W., & Gao, L. (2016). The impact of carbon trade on the management of short-rotation forest plantations. *Forest policy and economics*, 62, 30-35. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.forpol.2015.10.008>

Lampiran 1. NPV Kayu penjarangan, kayu berdiri, dan total kayu
Appendix 1. *NPV of thinning wood, standing wood, and total wood*

Tahun (Year)	Vol. Penjarangan/ Vol. thinning (m ³ /ha)		Vol. kayu berdiri / Stand vol. (m ³ /ha)		NPV penjarangan/ <i>thinning</i> (Rp/ha)		NPV akhir daur/ <i>end of rotation</i> (Rp/ha)		PV penanaman/ PV of plantation (Rp/ha)	NPV Total Kayu/ <i>Timber</i>	(Rp/ha)
	Bonita III	Bonita IV	Bonita III	Bonita IV	Bonita III	Bonita IV	Bonita III	Bonita IV		Bonita III	Bonita IV
1			3	8	-	-	-	-	390,000,000	-390.000.000	-390.000.000
2	4	15	31	49	14,705,882	22,058,824	-	-	198,823,529	-184.117.647	-176.764.706
3	18	27	65	89	43,631,471	75,057,663	-	536,787,981	135,130,702	-91.499.231	476.714.941
4	31	36	94	121	84,575,779	138,626,396	416,314,298	533,847,456	103,308,767	397.581.310	569.165.085
5	40	43	118	145	132,657,151	187,806,186	408,317,582	501,763,259	84,235,168	456.739.565	605.334.277
6	48	48	137	164	173,716,077	218,289,310	387,106,172	462,381,898	71,535,713	489.286.535	609.135.494
7	52	50	152	178	202,998,845	235,281,673	361,673,352	423,330,988	62,478,605	502.193.592	596.134.056
8	55	50	165	190	223,293,675	244,747,289	335,833,852	387,153,006	55,697,937	503.429.589	576.202.358
9	55	48	176	200	237,628,859	250,676,981	311,170,128	354,501,881	50,434,872	498.364.115	554.743.989
10	52	44	185	208	247,821,267	254,160,459	288,275,705	325,325,923	46,234,104	489.862.868	533.252.279
11	48	37	192	215	255,583,095	255,891,064	267,299,594	299,327,202	42,805,890	480.076.799	512.412.377
12	40	28	199	221	261,034,843	256,830,044	248,193,519	276,144,273	39,957,065	469.271.297	493.017.253

Lampiran 2. NPV Kayu, Karbon, dan Produksi Bersama Kayu dan Karbon pada harga karbon 3-7 USD/ton CO₂ eq.

Appendix 2. NPV of wood, carbon, and joint production of wood and carbon for carbon price of 3-7 USD/ton CO₂ eq.

Umur (Age) Tahun (years)	NPV Kayu (<i>Timber</i>)		NPV Karbon (<i>Carbon</i>) P=3 USD/ton CO ₂ eq.		LEV		NPV Karbon (<i>Carbon</i>) P=5 USD/ton CO ₂ eq.		LEV		NPV Karbon (<i>Carbon</i>) P=7 USD/ton CO ₂ eq.		LEV	
	BONITA													
	III	IV	III	IV	III	IV	III	IV	III	IV	III	IV	III	IV
2	-184,1	-176,8	7,6	12,0	-176,5	-164,7	12,7	20,1	-171,5	-156,7	17,7	28,1	-166,4	-148,7
3	-91,5	476,7	11,4	16,2	-80,1	492,9	18,9	27,0	-72,6	503,7	26,5	37,7	-65,0	514,4
4	397,6	569,2	13,5	18,3	411,1	587,5	22,5	30,6	420,1	599,7	31,5	42,8	429,1	612,0
5	456,7	605,3	15,0	19,3	471,7	624,6	25,0	32,1	481,7	637,4	35,0	45,0	491,7	650,3
6	489,3	609,1	15,9	19,4	505,2	628,5	26,5	32,3	515,7	641,4	37,0	45,2	526,3	654,3
7	502,2	596,1	16,2	19,0	518,4	615,1	27,0	31,6	529,2	627,8	37,9	44,3	540,1	640,4
8	503,4	576,2	16,2	18,4	519,7	594,6	27,1	30,7	530,5	606,9	37,9	42,9	541,3	619,2
9	498,4	554,7	16,1	17,8	514,5	572,5	26,8	29,7	525,2	584,4	37,5	41,5	535,9	596,3
10	489,9	533,3	15,8	17,2	505,7	550,4	26,4	28,6	516,2	561,9	36,9	40,1	526,8	573,3
11	480,1	512,4	15,5	16,6	495,6	529,0	25,9	27,6	506,0	540,1	36,2	38,7	516,3	551,1
12	469,3	493,0	15,2	16,0	484,5	509,0	25,3	26,7	494,6	519,7	35,4	37,4	504,7	530,4